

KWANTUM- FYSICA

EENVOUDIG UITGELEGD

DELTA Δ S

Dank
Met dank aan Robbe De Prins voor zijn
deskundige medewerking aan de
Nederlandse uitgave.



Original Title: *Simply Quantum Physics*
Copyright © Dorling Kindersley Limited,
MMXXI. A Penguin Random House Company
Nederlandse uitgave

© Zuidnederlandse Uitgeverij N.V.,
Vluchtenburgstraat 7,
B-2630 Aartselaar, België, MMXXV.
Alle rechten voorbehouden.

Deze uitgave door: Deltas, België-Nederland
Nederlandse vertaling: Kitty Polderman

D-MMXXIV-0001-183
NUR 910

INHOUD

DE KWANTUMWERELD

- 8 **ONGELOOFLIJK KLEIN**
De subatomaire schaal
- 10 **DRIE PIEPKLEINE DEELTJES**
De structuur van het atoom
- 12 **PARTICLE ZOO**
Subatomaire deeltjes
- 14 **WAT IS LICHT?**
Elektromagnetische straling
- 15 **EEN CONSTANTE OP
KWANTUMNIVEAU**
De constante van Planck
- 16 **RIMPELS IN DE RUIMTE**
Golven
- 18 **GOLF OF DEELTJE**
Dualiteit van golven en deeltjes
- 20 **ALLES BIJEENHOUDEN**
De sterke kernkracht
- 21 **DE KRACHT VAN VERVAL**
De zwakke kernkracht
- 22 **TEGENPOLEN TREKKEN ELKAAR
AAN**
De elektromagnetische kracht
- 23 **TOT ELKAAR AANGETROKKEN**
De zwaartekracht

RAADSELS VAN VÓÓR DE KWANTUMFYSICA

- 26 **GEÏDEALISEERDE OBJECTEN**
*De straling van een zwart
lichaam*
- 27 **DE ULTRAVIOLETCATASTROFE**
De wet van Rayleigh-Jeans

- 28 **ENERGIEPAKKETJES**
De kwantisatie van energie
- 30 **ENERGIETOESTANDEN**
De energieniveaus van een atoom
- 31 **WOLKEN VAN WAARSCHIJNLIJKHEDEN**
Orbitalen van elektronen
- 32 **FOTONENERGIE**
Het foto-elektrische effect

DE GOLFFUNCTIE

- 36 **EEN KWANTUMTOESTAND BESCHRIJVEN**
De golffunctie
- 38 **OP TWEE PLAATSEN TEGELIJKERTIJD**
Superpositie
- 40 **HET KWADRAAT VAN EEN GOLF**
De regel van Born
- 41 **GOLVEN EN TRANSFORMATIES**
Fouriertransformaties
- 42 **NIET ALLES IS BEKEND**
Het onzekerheidsprincipe van Heisenberg
- 44 **VERANDERING VOORSPELLEN**
De schrödingervergelijking
- 46 **EEN METING ONTWIJKEN**
Het meetprobleem
- 48 **INSTORTING**
Het instorten van de golffunctie
- 49 **EEN PARADOX IN EEN DOOS**
Schrödingers kat

INTERPRETATIES VAN KWANTUMFYSICA

- 52 **KWANTUMFYSICA BEGRIJPEN**
De Kopenhaagse interpretatie
- 54 **ALLES KAN EN ZAL GEBEUREN**
De veel-wereldeninterpretatie
- 55 **EEN ONEINDIGE HERHALING**
De kosmologische interpretatie

- 56 **EEN VERBORGEN INVLOED**
De interpretatie van de verborgen variabelen
- 58 **EEN KWANTUMHANDDRUK**
De transactionele interpretatie
- 59 **EEN SPONTANE INSTORTING**
Objectieve hypothese van instorting
- 60 **NATUURLIJKE SELECTIE**
Kwantumdarwinisme
- 61 **DE OVERTUIGING VAN DE WAARNEMER**
Bayesiaanse kwantummechanica
- 62 **DOOR HET DOOLHOF**
Consistente geschiedenissen
- 63 **VERSCHILLENDE STANDPUNTEN**
De relationele interpretatie

KWANTUM-VERSCIJNSELEN

- 66 **'SPIN'**
Het intrinsieke impulsmoment
- 67 **VELDEN DIE AANTREKKEN**
Magnetische momenten
- 68 **DE VERDELING**
Fermionen en bosonen
- 69 **GEEN PLAATS VOOR TWEE**
Het uitsluitingsprincipe van Pauli
- 70 **WELKE BARRIÈRE?**
Kwantumtunneling
- 72 **AFSTAND IS GEEN BEZWAAR**
Kwantumverstrengeling
- 74 **KWANTUMTELEPORTATIE**
Kwantumtoestanden verzenden
- 75 **EEN INSTABIELE OMGEVING**
Decoherentie
- 76 **BINNEN IN VASTE OBJECTEN**
Vastestoffysica
- 78 **GEWIJZIGDE TOESTANDEN**
Bose-einsteincondensaten

- 80 **STROMEN ZONDER WRIJVING**
Superfluiditeit
- 81 **EINDELOZE LADING**
Supergeleiding
- 82 **VREEMDE KWANTUMATOMEN**
Koude-atoomfysica
- 83 **ONGEBRUIKELIJKE BANEN**
Rydbergatomen

KWANTUM- TECHNOLOGIE

- 86 **FOTONEN AFSCHIETEN NAAR ATOMEN**
Gestimuleerde emissie
- 87 **ENORM GECONCENTREERD**
Lasers
- 88 **DE TIJD REGISTREREN**
Atoomklokken
- 90 **VASTE STOFFEN**
De bandtheorie van vaste stoffen
- 91 **SILICIUMCHIPS**
Transistoren
- 92 **LICHT UITSTRALEN**
Licht-emitterende diodes
- 93 **FOTONEN OPVANGEN**
Charge-coupled devices
- 94 **LEVITATIE**
Supergeleidende elektromagneten
- 95 **TUNNELING MET PAREN**
De josephson-junctie
- 96 **SQUID'S**
Superconducting quantum interference devices
- 98 **BINNENIN KIJKEN**
Magnetic resonance imaging
- 100 **ZIEN ZONDER LICHT**
Elektronenmicroscopen
- 102 **DE ATOMAIRE SONDE**
Atoomkrachtmicroscopie

KWANTUM- INFORMATIE

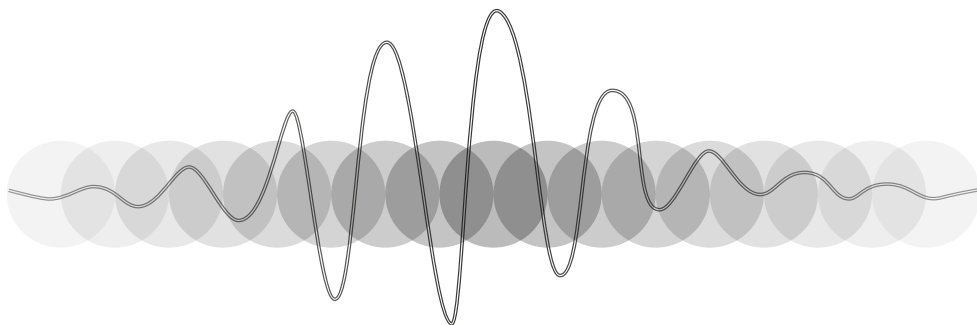
- 106 **MEER DAN ALLEEN MAAR ENEN EN NULLEN**
Qubits
- 107 **SUPERSNEL**
Kwantumcomputing
- 108 **CODES OP KWANTUMNIVEAU**
Kwantumcryptografie
- 109 **SIMULATORS**
Kwantumsimulatie

KERNFYSICA

- 112 **OP ZOEK NAAR STABILITEIT**
Radioactiviteit
- 114 **ATOMEN SPLIJTEN**
Kernsplijting
- 116 **KERNEN SAMENVOEGEN**
Kernfusie

DEELTJESFYSICA

- 120 **ONGRIJPBARE DEELTJES OP HET SPOOR**
Deeltjesdetectors
- 121 **VLIEGENSVLUG VERPLETTEREN**
Deeltjesversnellers
- 122 **KLEINER DAN EEN ATOOM**
Quarks
- 123 **GEEN STERKE INTERACTIES**
Leptonen
- 124 **DE KWANTUMWERELD BEGRIJPEN**
Het standaardmodel
- 126 **KRACHTDRAGERS**
IJkbosonen
- 127 **WAAROM DEELTJES EEN MASSA HEBBEN**
Het higgsboson



- 128 **HET TEGENGESTELDE VAN MATERIE**
Antimaterie
- 130 **NIET ZO STANDAARD**
Buiten het standaardmodel om
- 132 **UNIVERSELE VELDEN**
De kwantumveldentheorie
- 134 **HET KROONJUWEEL VAN DE FYSICA**
Kwantumelektrodynamica
- 135 **DE DRIE KLEUREN VAN EEN QUARK**
Kwantumchromodynamica

DE KWANTUM-ZWAARTEKRACHT

- 138 **GEBUNDELDE KRACHTEN**
A theory of everything
- 140 **KWANTUMSCHUIM**
Plancklengte en -tijd
- 142 **TRILLENDE MINISNAREN**
Snaartheorieën
- 143 **ALLES SAMENGEVOEGD**
De M-theorie
- 144 **HET WEEFSEL VAN DE RUIMTE**
De lus-quantumzwaartekracht

KWANTUMBIOLOGIE

- 148 **FOTONEN EN GEBLADERTE**
Fotosynthese
- 150 **IN ONS DNA**
Een kwantumtheorie van celmutatie

- 151 **TUNNELING OM EEN REACTIE TE VEROORZAKEN**
Enzymen en kwantumfysica
- 152 **MAGNETORECEPTIE**
Kwantummechanische navigatie
- 154 **ONZE REUKZIN**
Onze neus volgens de kwantumfysica
- 155 **EEN KWANTUMBEWUSTZIJN?**
Onze geest volgens de kwantumfysica
- 156 **REGISTER**

Adviserend redacteur

Dr. Ben Still is een bekroonde wetenschapsvoorlichter, deeltjesfysicus en auteur. Hij doceert fysica aan een middelbare school en is gastonderzoeker aan de Queen Mary University of Londen. Ook is hij de auteur van een groeiende collectie wetenschappelijke boeken voor leken. Daarnaast reist hij de wereld rond om lezingen te geven over deeltjesfysica, waarbij hij gebruikmaakt van LEGO®.

Medewerkers

Hilary Lamb is een bekroonde journaliste en auteur die over wetenschap en technologie schrijft. Een greep uit haar oeuvre: *The Visual Encyclopedia*, *How Technology Works* en *The Physics Book*.

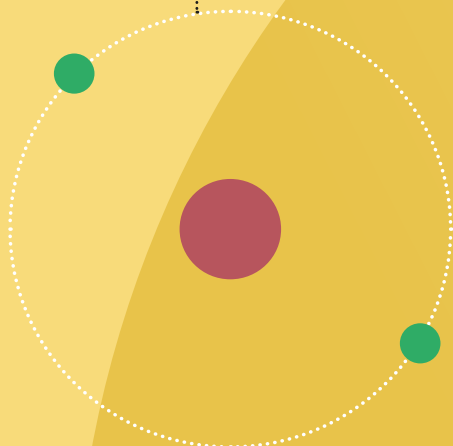
Giles Sparrow is een auteur van populair-wetenschappelijke werken, en is gespecialiseerd in fysica en astronomie. Hij heeft onder meer de volgende bestsellers geschreven of eraan bijgedragen: *The Physics Book*, *Spaceflight*, *Universe* en *Science*.

DE KWANTUM- WERELD

De kwantumfysica beschrijft de manier waarop het universum zich op de allerkleinste schalen gedraagt. Deze fysica begeeft zich in het rijk ver onder de limieten van zelfs de krachtigste microscopen. Ze bepaalt de gedragingen en interacties van atomen en de deeltjes waaruit atomen zijn opgebouwd: de fundamentele bouwsteentjes van materie. Pas toen J.J. Thomson in 1897 het elektron ontdekte, bevestigden wetenschappers het bestaan van subatomaire deeltjes. Maar de mogelijkheid dat deze piepkleine deeltjes zich soms als golven kunnen gedragen, wat cruciaal is voor het vreemde gedrag van de kwantumwereld, werd pas in 1924 geopperd door Louis-Victor de Broglie.

ATOOM 10^{-10}m

Atomen zijn zo'n 100.000 maal kleiner dan elk object dat met het blote oog kan worden waargenomen. Het grootste gedeelte van het volume van een atoom bestaat uit 'lege' ruimte.



In het middelpunt van het atoom bevindt zich de kern: een compact gebied dat bijna alle massa van het atoom bevat.

KERN
 $10^{-14}\text{m} - 10^{-15}\text{m}$



NUCLEONEN 10^{-15}m

De kern van een waterstofatoom bestaat uit een enkel subatomair protondeeltje. De kern heeft een diameter van 1,8 biljardste van een meter.



QUARK 10^{-18}m

Quarks zijn een bepaald soort elementaire deeltjes. Ze zijn bouwstenen voor materie.



De elektronen die ronddraaien in een baan in de buitenste schillen van atomen zijn elementaire deeltjes. Hun grootte is vergelijkbaar met die van quarks.

ELEKTRON $\sim 10^{-18}\text{m}$



Groottes op kwantumniveau

De kwantumfysica bestudeert verschijnselen die plaatsvinden bij extreme metingen. Subatomaire deeltjes kunnen niet rechtstreeks worden waargenomen. Ze kunnen wel worden bestudeerd met behulp van experimenten waarin hun effecten worden waargenomen.



PLANCKLENGTE
 10^{-35}m

Dit is de kleinste lengte-eenheid die binnen de huidige theorieën van de fysica te bevatten valt. Bij lengtes gelijk aan of kleiner dan de plancklengte houden de huidige theorieën van de fysica niet langer stand, en kunnen er geen logische voorspellingen meer worden gedaan.

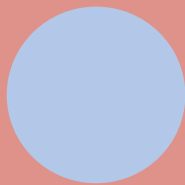
ONGELOOFLIJK KLEIN

De grootste atomen hebben een diameter van ongeveer een halve nanometer (een miljardste van een meter): dit is minder dan 1/100.000ste van de breedte van een mensenhaar. Het volume van atomen bestaat grotendeels uit een ijle wolk gevuld met elektronen, rondom een compacte centrale kern.

De diameter van atoomkernen bedraagt meestal een paar femtometer (een biljardste van een meter). Rond deze schalen (en zelfs nog kleiner) treden er gewoonlijk vreemde verschijnselen uit de kwantumfysica op. De kleinste afstand die fysisch logisch is, is de meeteenheid van een plancklengte (zie blz. 140-141).

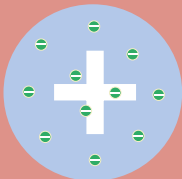
HET MODEL VAN DE MASSIEVE BOL

In 1803 zette John Dalton zijn theorie uiteen dat alle materie uit atomen is opgebouwd: onzichtbare bollen die niet kunnen worden gecreëerd of vernietigd. Atomen kunnen zich echter aan elkaar binden of van elkaar worden gescheiden om nieuwe stoffen te vormen.



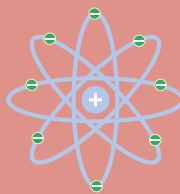
HET PLUMPUDDINGMODEL

In het model van J.J. Thomson zitten negatief geladen elektronen willekeurig verspreid in een bol, die zelf een positieve lading heeft.



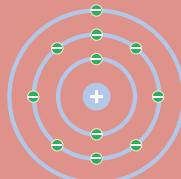
HET ATOOMMODEL VAN RUTHERFORD

In 1911 kwam Ernest Rutherford door experimenteel bewijs tot een bepaald voorstel. Hij beweerde dat alle positieve elektrische lading in een atoom zich in een kleine, compacte kern bevindt, en dat de elektronen in een baan om deze kern zouden draaien, zoals manen om een planeet.



HET ATOOMMODEL VAN BOHR

Om lichtabsorptie en -emissie van atomen te verklaren ontwikkelde Niels Bohr een model waarin elektronen alleen maar in een baan konden draaien in bepaalde 'schillen' met een welbepaalde energie.



DRIE PIEPKLEINE DEELTJES

Atomen zijn de fundamentele bouwsteentjes van grootschalige materie. Van deze deeltjes werd eerst gedacht dat ze ondeelbaar waren, en dat de gemeenschappelijke chemische en fysische eigenschappen ervan typerend waren voor de specifieke elementen. Maar op een dieper niveau bestaan alle atomen uit een combinatie van drie subatomaire deeltjes: positief geladen protonen en ongeladen neutronen in een centrale kern, en negatief geladen elektronen die in een baan draaien in verder afgelegen wolken (zie blz. 31), die het hoogstwaarschijnlijk mogelijk maken dat atomen zich aan andere atomen kunnen binden.